

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.03.11

基于自动实时监测系统的天马 VGOS 望远镜热膨胀研究

宋世泽^{1,2}, 王广利^{1,2}, 郑 勇³, 张志斌^{1,2}, 孙正雄^{1,2}, 骆亚波⁴

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 信息工程大学, 郑州 450000; 4. 长沙理工大学, 长沙 410000)

摘要: 射电望远镜的热膨胀是大地测量和天体测量 VLBI (甚长基线干涉测量) 数据分析中不可忽视的影响因素。为了研究天马 13.2 m VGOS (VLBI 全球观测系统) 射电望远镜热膨胀, 开发了一套监测系统, 可自动和实时地监测天线结构的热形变。通过连续观测安装在天线方位轴上、距离参考点正下方 1.5 m 的靶标, 监测系统可以确定棱镜的三维位置变化。通过从 2020 年 11 月 10 日至 2021 年 8 月 31 日的连续监测, 发现 10 个月内棱镜高度最大变化为 2.6 mm, 一天之内最大变化为 0.2 mm; 10 个月内棱镜在水平方向上的位移为 0.1 mm。最后, 利用天马 VGOS 的高度热形变验证了 IERS (国际地球自转服务) 热膨胀模型, 结果表明它们之间的残差小于 1.5 mm, 残差的 *RMS* 为 0.43 mm。该结果可以满足当前常规的 VLBI 测量, 但不能满足 VGOS 的精度要求。因此, 对于 VGOS 天线, 需要重新考虑 IERS 热膨胀模型。

关 键 词: VGOS; 热膨胀; 监测系统; 相关性

中图分类号: P228

文献标识码: A

1 引 言

对于当前 IVS (国际 VLBI 大地测量和天体测量服务) 的常规天线 (口径 20 m 左右), 射电望远镜的热膨胀会导致参考点高度发生 4 ~ 6 mm 的周年变化, 而对 100 m 口径的 EFLSBERG 天线会导致 20 mm 的周年变化^[1]。目前, 在大地测量和天体测量 VLBI 数据分析中, 主要是通过模型来减弱天线热膨胀的影响。利用 IERS 规范 2010 推荐的热膨胀模型, 可以将参考点高度的热形变维持在毫米级的精度^[2]。1995 年, IERS 热膨胀模型由 Nothnagel 根据 Hartebeesthoek (HartRAO) 射电望远镜热形变的实测数据建立。通过对温

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-29

资助项目: 国家自然科学基金 (y846481001, 12103077)

通讯作者: 宋世泽, ssz@shao.ac.cn

度和参考点热高度时间序列进行相关性分析, 得到目前 IERS 热膨胀模型的有关参数——时间滞后 (天线结构产生热形变相对于温度的时间延迟)。2013 年, Bail 等人将时间滞后分别固定为 0 ~ 9 h (依次递增 1 h), 并代入热膨胀模型, 然后计算了全球 19 个 VLBI 台站的基线。结果表明当时时间滞后为 0, 1 或 2 h 时, 各基线的 WRMS 最小且量级相当^[3]。时间滞后多解的原因可能是当时的观测技术导致, 时间滞后参数的精度较低, 或者是 IERS 热膨胀模型本身具有误差。因此, Altamimi 在 ITRF2020 (国际地球参考架 2020) 参与要求中, 共四次呼吁验证或改进当前的热膨胀模型^[4]。

对天线参考点高度进行实时监测, 也是估计和改正天线结构热形变的一种方法。比如, Onsala 20 m^[5] 和 Wettzell 20 m^[6] 射电望远镜通过观测安装在参考点附近的因瓦线 (或杆), 实时监测天线参考点高度随温度的变化。因瓦线能够以优于 0.1 mm 的精度观测参考点高度的季节性和周日变化, 但目前绝大部分 VLBI 台站都不具备这种条件。而且, 因瓦线无法测量天线结构在水平方向上的热形变。

除了上述两种估计天线热膨胀影响的方法, 2005 年 Wresnik 等人在 IERS 热膨胀模型的基础上, 采用 Onsala 20 m 台站的因瓦杆获取的参考点高度实测数据, 对天线钢铁和混凝土结构的温度进行建模, 从而解决了气温与天线结构温度之间的时间滞后问题^[7]。这种方法考虑了环境温度对天线结构加热、散热效应, 以及天线结构对自身温度的记忆, 并对实测的参考点高度进行数字滤波, 以求解模型中的系数。但由于这种方法过于复杂, 因此没有被广泛采用。

目前对天线热膨胀的研究仅局限于参考点高度, 而水平方向的热形变很少有文献涉及, 主要原因是很难获取足够的参考点水平位置时间序列。由于 VLBI 天线的参考点并不是一个物理点, 而是天线固定的旋转轴 (即方位轴) 与过运动轴 (即天线俯仰轴) 垂直于固定旋转轴的平面之间的交点^[8]。因此, 只能通过间接法, 比如三维圆拟合^[9-11] 与转换法^[12], 来测量参考点的三维位置。间接法是通过观测天线结构上与天线随动的靶标来确定天线的方位轴和俯仰轴, 从而确定参考点的位置。这种方法要求靶标具有良好的空间覆盖, 才能得到优于 1 mm 的精度, 因此需要 1 d 以上的观测才能确定参考点的位置。由于参考点位于天线的对称轴上 (即方位轴), 其在水平方向上的有效长度很小, 因此, 以毫米级或亚毫米级的精度无法观测到参考点在水平方向上的热形变。间接法无论是在精度上还是在数据量上, 都难以实现参考点在水平方向上的热形变监测。目前, 间接法主要用来确定并置站上不同台站之间的向量——本地连接。

为了实现在 24 h 内达到 1 mm 定位精度的 VLBI2010 目标^[8], VGOS 望远镜天线参考点的三维位置 *RMS* 必须是稳定到或建模到 0.3 mm。因此, 我们开发了一套监测系统, 以实时和自动地监测天马 13.2 m VGOS 射电望远镜的热形变。经过 10 个月的监测发现, 天线高度最大变化为 2.6 mm, 一天之内最大变化为 0.2 mm; 10 个月内棱镜在水平方向上的位移为 0.1 mm。我们对参考点高度热形变和环境温度进行了相关性分析, 结果表明两组数据的时间序列所包含的周期信号的频率完全相同。由于棱镜安装在天线方位轴上, 即天线结构的对称轴, 其对应的热膨胀有效长度几乎为零, 因此天线结构的水平热形变不显著。可能是水平热形变较小, 易受到其他因素的干扰 (比如风), 因此观测到的水平热形变仅在长期

趋势上与温度相关。

2 方 法

天马 VGOS 监测系统的基本原理是：1) 安装在天线方位轴上的棱镜不受重力形变影响^[13]，即棱镜的位置变化主要由天线热膨胀所引起^[1]；2) IERS 热膨胀模型的基本依据是，天线结构随温度以对称的方式膨胀或收缩。因此，安装在天线方位轴上且距离参考点很近的棱镜位置时间序列可以反映参考点的位置变化。

天马 VGOS 监测系统主要由控制系统、观测系统和存储系统三部分组成。控制系统是由信息工程大学 (郑州) 开发的 RocBox 控制盒。RocBox 是一个嵌入式系统，可根据观测纲要向观测系统和存储系统发送指令。如图 1 所示，观测系统由一台拓普康 DS101AC 全站仪和 AK11 反射棱镜组成。监测系统选配日本拓普康 DS101AC 型高精度全站仪，其主要技术指标为：测角精度 1″，测距精度 $(1.5 + 2 \times 10^{-6}D)$ mm，精密测量时间 0.9 s，工作温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 。测距误差随距离 D 增加。对于本文的情况，当 $D = 8\text{ m}$ 时，这项误差可忽略不计。

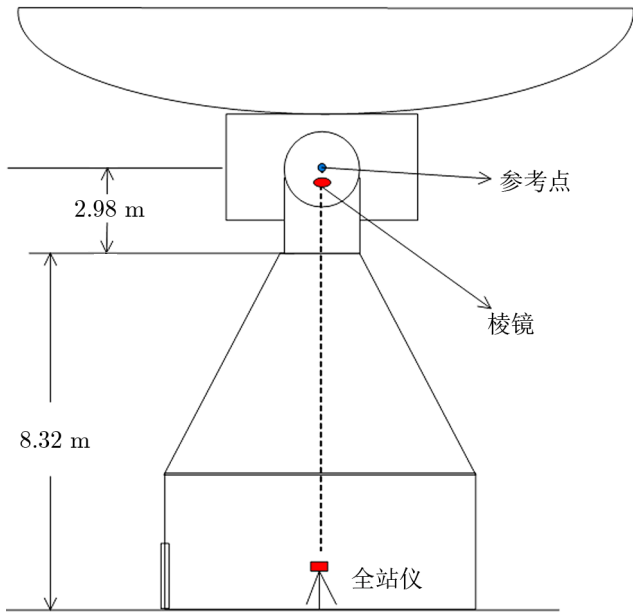


图 1 天马 VGOS 参考点监测系统

存储系统包括两种模式：1) 通过电缆传输的本地存储；2) 通过网络传输的无线存储。

为了监测棱镜位置变化，我们收集了从 2020 年 11 月 10 日至 2021 年 8 月 31 日的观测数据。全站仪采用自动识别模式，自动照准棱镜并观测。为了检测异常值，全站仪一个周期连续观测两次，每分钟一个周期。由于天线热形变是一个相对变化量，因此我们使用了单

chinaXiv:202306.00389v1

盘 (盘左) 测量模式。由于全站仪中心、棱镜中心和参考点几乎位于同一条直线上, 并且在监测期间, 除了天线系统测试外, 其余时间天马 VGOS 望远镜是不动的, 因此, 可认为观测值中包含的仪器误差是恒定的。这对于测量相对量——热形变来说, 是没有影响的。将每个周期内连续两次的观测值 (包括水平角、天顶距和斜距) 作差, 可以初步识别异常值。根据差值的中误差以及误差传播定律, 推导出水平角、天顶距和斜距的中误差分别为 $113.6''$, $0.7''$ 和 0.1 mm 。水平角中误差较大是由于棱镜几乎位于天顶, 而在这个方向上水平角接近奇异。根据计算, 在水平方向上全站仪至棱镜的距离为 1 cm , 水平角中误差 ($113.6''$) 对应的水平热形变仅为 $6 \mu\text{m}$ 。因此, 水平角的精度足以监测棱镜水平位置的变化。

本文将天线结构的热形变分为两部分, 即水平方向和垂直方向。由于本文是通过观测棱镜的位置变化来监测射电望远镜的热形变, 因此垂直方向上的有效天线结构包含从基墩底部至棱镜中心的部分。

2.1 二维转换模型

由于安装误差, 棱镜并不是位于天线方位轴上。我们将棱镜随天线转动一周的圆轨迹中心定义为近似参考点。这样, 棱镜至近似参考点的水平距离的变化就可以用来描述天线结构在水平方向上的热形变。事实上, 棱镜至近似参考点的水平距离很近 (小于 0.2 mm), 因此, 在水平方向上, 参考点的热形变可通过棱镜反映。

首先引入两个坐标系, 全站仪的观测坐标系以及 VGOS 天线坐标系。观测坐标系的原点位于全站仪中心; 经过后视定向后, 定义轴 x 为全站仪的横轴; 轴 z 为本地铅垂线; 轴 y 分别与轴 x 和轴 z 垂直, 构成右手系。天线坐标系的原点为近似参考点; 轴 y 与 VGOS 天线的初始指向平行, 即 0 方向; 轴 z 为天线方位轴; 轴 x 分别与轴 y 和轴 z 垂直。两个坐标系均是右手系。二维转换模型, 由式 (1) 给出:

$$\mathbf{P}_{\text{total}} = \mathbf{R}(A) \cdot \mathbf{E} + \mathbf{T}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P}_{\text{total}}$ 表示棱镜在观测坐标系下的水平位置, A 表示望远镜的方位角, \mathbf{R} 表示一个二维旋转矩阵, \mathbf{E} 表示棱镜在天线坐标系中的初始坐标, \mathbf{T} 表示天线坐标系原点在观测坐标系的坐标。式 (1) 描述了棱镜在随天线转动过程中, 两坐标系之间的转换关系。

我们只关心棱镜至近似参考点的距离变化, 因此, 我们将式 (1) 变换为:

$$\|\mathbf{E}\|_2 = \|\mathbf{P}_{\text{total}} - \mathbf{T}\|_2. \quad (2)$$

为了方便描述, 本文用 r 代替二范数 $\|\mathbf{E}\|_2$ 。

为了确定棱镜与近似参考点的相对位置关系, 在 2020 年 11 月 10 日和 2021 年 8 月 31 日分别做了两次实验, 定义为实验一和实验二。如图 2 所示, 将 VGOS 天线指向按照方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ 转动, 每隔 20° 天线静止 2 min ; 共转动 3 个圆周, 3 个圆周对应的天线高度角分别为 0° , 45° 和 89.9° ; 棱镜随天线随动, 其位置随天线方位角发生变化。

将数据代入式 (1), 使用最小二乘法得到二维转换模型的估值, 结果见表 1。表 1 中, (T_x, T_y) 表示 \mathbf{T} 的估值, (E_x, E_y) 表示 \mathbf{E} 的估值。由 \mathbf{T} 的估值可以计算出, 近似参考点至全站仪中心的距离约 1 cm 。由 \mathbf{E} 的估值可知, 棱镜至近似参考点的距离约 0.2 mm 。需要

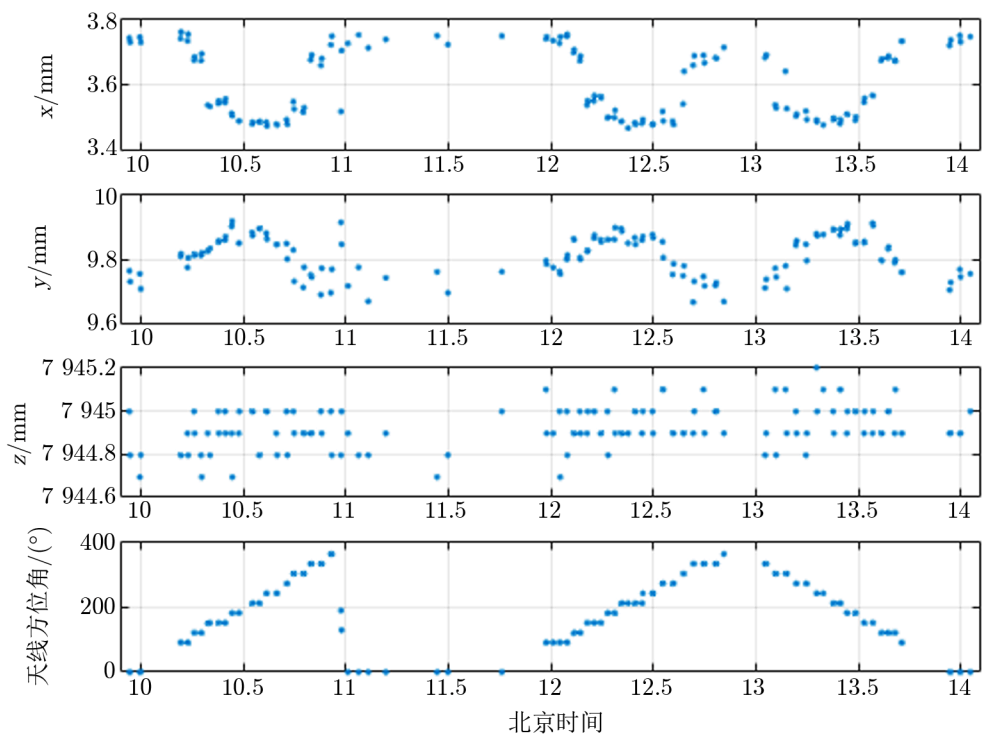


图 2 棱镜位置随天线方位角的变化

说明的是，表 1 中估值的中误差仅代表形式精度。由于热形变属于相对量，因此本文最关心的是棱镜位置的相对变化。

表 1 二维转换模型的最小二乘法估计结果

		mm			
		T_x	T_y	E_x	E_y
实验一	估值	3.61	-9.81	0.12	0.02
	中误差	± 0.006	± 0.016	± 0.006	± 0.013
实验二	估值	3.55	-9.84	0.12	-0.125
	中误差	± 0.012	± 0.033	± 0.0165	± 0.017

全站仪对棱镜的每一次观测都能得到一个坐标，即 \mathbf{P}_{total} ，将观测值和表 1 中的结果代入式 (2)，就得到了棱镜至近似参考点的距离。通过长期连续的监测，就可以获取棱镜水平位移的时间序列。由于本文只关心棱镜水平位置的相对变化，因此在解算棱镜水平位移的时间序列时，只采用表 1 中 2020 年 8 月 31 日的观测结果。以上就是对天线水平热形变实时监测的原理。

2.2 天线参考点高度监测方法

由于棱镜距离近似参考点只有 0.2 mm，这使得棱镜随天线转动的圆形轨迹等效为一个点，因此，全站仪无法测出圆轨迹相对于水平面的倾斜。假设天线方位轴倾斜 1° ，在

0.2 mm 范围内, 对于测距的影响不超过 $4\text{ }\mu\text{m}$ 。事实上天线方位轴倾斜不可能超过 11° , 因此, 对于距离观测值不需要考虑方位轴倾斜的影响。

当棱镜随天线转动时, 天顶距的变化会引起棱镜斜距的改变, 这个过程可描述为:

$$\Delta sd = \frac{h \sin z}{\cos^2 z} \Delta z, \quad (3)$$

其中, h 表示棱镜的高度, z 表示棱镜的天顶距, Δz 表示天顶距变化, Δsd 表示斜距变化。通过计算, Δsd 的最大值小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。也就是说, 斜距观测值变化与天线转动无关。

棱镜高度与斜距的关系可由式 (4) 描述:

$$sd - h = sd(1 - \cos z). \quad (4)$$

通过计算, $sd - h$ 的最大值为 $7\text{ }\mu\text{m}$, 即可以认为棱镜的斜距等于其高度。

根据以上分析, 本文将通过棱镜斜距观测值的变化来描述天线参考点高度的热形变。

3 结 果

3.1 水平热形变

在观测期间, 天马 VGOS 天线附近的施工活动对天线造成轻微的晃动。根据计算, 施工仅对棱镜的水平位置造成影响, 而对高度没有影响。图 3 显示了 2021 年 5 月 21 日至 2021 年 8 月 9 日的观测结果, 蓝色部分是在停工期间的观测, 红色部分是施工阶段的观测。在这段观测时间内, 天线处于维修状态, 棱镜的水平位置主要受热形变和施工的影响。可以看出, 施工导致棱镜在水平方向上偏移 0.1 mm 左右。

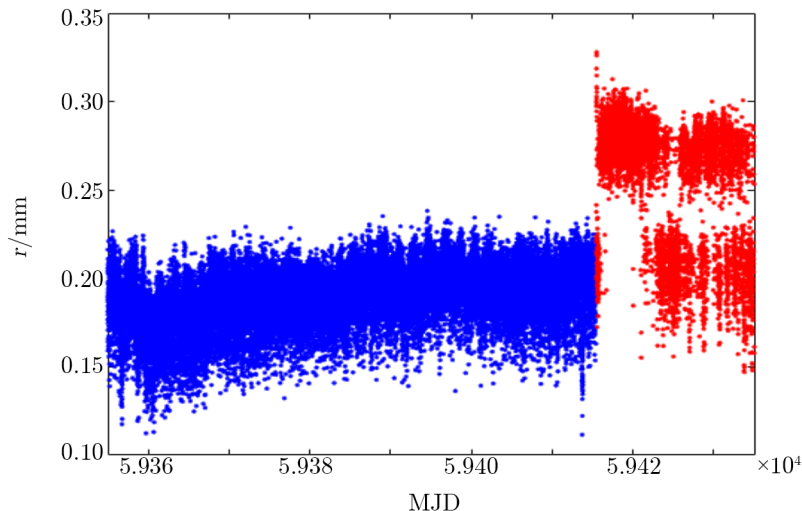


图 3 棱镜至近似参考点的距离 r 的时间序列

为了研究天线结构水平热形变, 我们仅使用停工期间的观测结果。为了消除观测噪声的

影响,我们分别对温度和 r 时间序列进行高斯滤波。窗口设定为 1 h,以保留观测值中的周日信号。图 4 给出 2021 年 5 月 21 日至 2021 年 7 月 18 日的结果,可以看出温度与水平热形变在 24 h 周期上没有显著的相关性,而它们存在相同的长期趋势。这可能是因为棱镜对应的天线结构的有效长度较短 (0.2 mm),相应的水平热形变量级较小 (温差 20°C 范围内,水平热形变约 0.05 mm),易受其他因素的干扰,比如风。

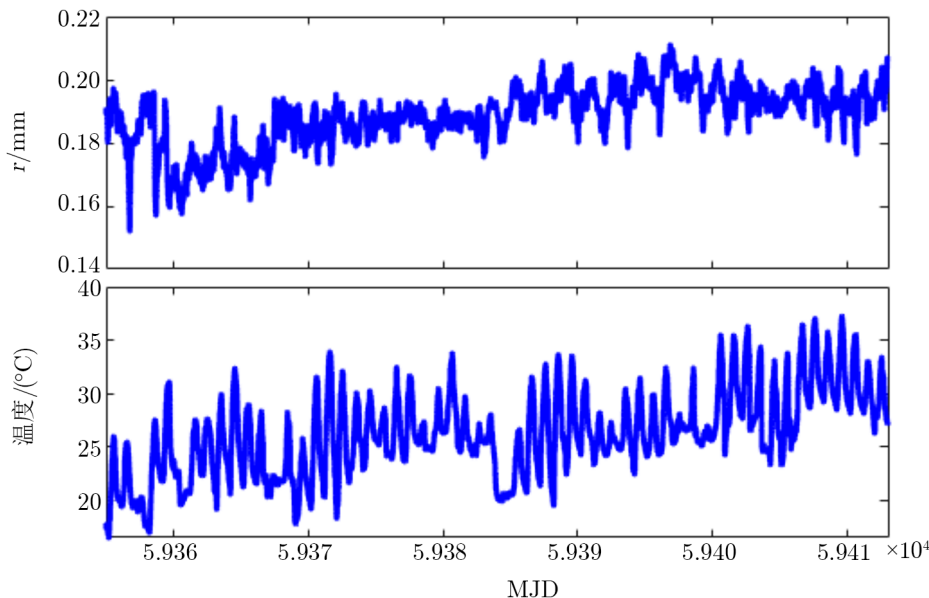


图 4 温度与 r 的相关性

3.2 高度热形变

施工对棱镜高度没有影响,因此我们使用全部观测数据来研究天线高度随温度的变化,但为了清晰地表达出高度与温度之间的相关性,图 5 只显示了 30 d 的观测结果 (2020 年 11 月 10 日至 2020 年 12 月 10 日)。分别对高度和温度时间序列进行快速傅里叶变换,将观测值转换到频域,结果表明两组数据的周期完全一致,并且长期项 (周期无限大) 和 24 h 周期信号的振幅是最大的。根据计算,参考点高度变化与温度之间的皮尔森相关系数为 0.8。图 6 表示两组数据分别分解为长期项和周期的结果, a) 表示天线高度数据, b) 表示温度数据。由图 6 可知,天线高度的热形变与温度之间的周期信号和长期趋势都存在显著的相关性。

最后,使用观测到的天线高度热形变来验证 IERS 热膨胀模型。由于监测系统对天线高度的观测只涉及垂直部分,因此我们将 IERS 热膨胀模型^[1]改写为:

$$\Delta h = \gamma_f(T(t - \Delta t_f) - T_0)h_f + \gamma_a(T(t - \Delta t_a) - T_0)h_a, \quad (5)$$

其中, Δh 表示天线高度热形变, γ_a 和 γ_f 分别表示钢铁和混凝土结构的热膨胀系数, Δt_a 和 Δt_f 分别表示钢铁和混凝土结构的时间滞后, h_a 和 h_f 分别表示钢铁和混凝土结构的有效长度, T 表示天线结构的环境温度, T_0 是天线的参考温度。IERS 热膨胀模型给出的钢

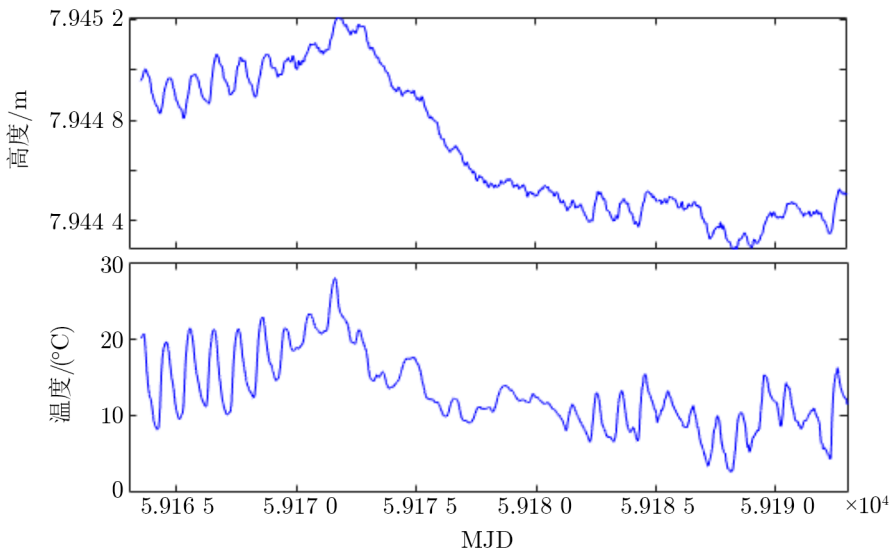


图 5 高度与温度的相关性

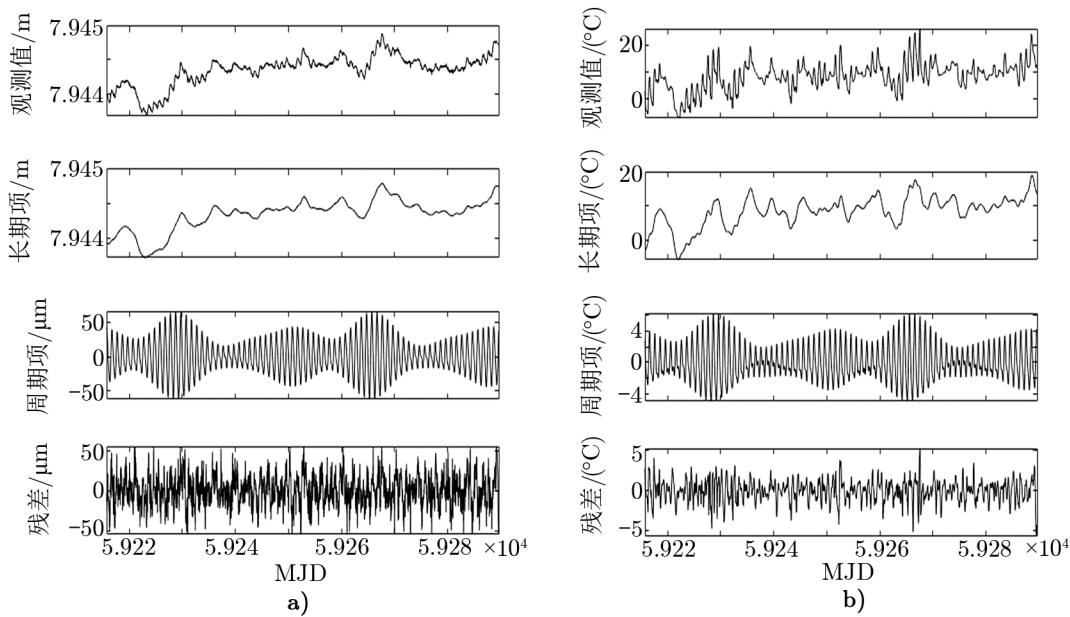


图 6 将高度 (图 a)) 和温度 (图 b)) 观测值分别分解期趋势项和周期信号

铁和混凝土的热膨胀系数分别为 $\gamma_a = 12 \times 10^{-6} \text{ m}/(^{\circ}\text{C})$ 和 $\gamma_f = 10 \times 10^{-6} \text{ m}/(^{\circ}\text{C})$, 钢铁和混凝土的时间滞后分别为 2 h 和 6 h^[1]。将天马 VGOS 天线的热膨胀有效长度代入 IERS 热膨胀模型, 并与监测系统的实测数据比较, 结果如图 7 所示。根据解算, IERS 热膨胀模型与实测数据之间残差小于 1.5 mm, 并且残差的 *RMS* 为 0.43 mm。从图中可以看出, IERS 热膨胀模型可以消除大部分的周年变化, 这个结果与文献 [1] 中的结果吻合。

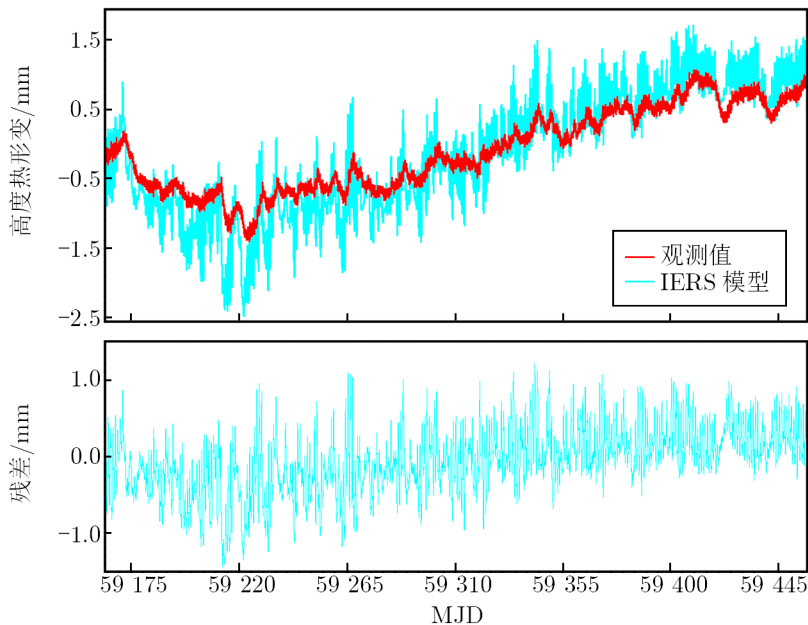


图 7 IERS 热膨胀模型与天线参考点高度热形变的观测结果比较

4 结 论

天马 VGOS 监测系统不仅可以实时监测参考点高度随温度的变化, 而且可以反映参考点的水平热形变。由于参考点位于天线的对称轴上, 其对应的水平方向有效长度很小, 因此其水平方向的热形变非常小。根据目前的监测结果, 其水平热形变的周年变化不会超过 0.1 mm。但是 VGOS 高度的热形变是不能忽略的, 目前的 IERS 热膨胀模型只能将 *RMS* 改正到 0.43 mm 水平, 还不能满足 VLBI2010 的要求。虽然 IERS 热膨胀模型的精度可以满足当前常规的 VLBI 测地和天体测量的应用, 但对于 VGOS 天线则应该重新考虑。

根据计算, 天线热高度与环境温度之间具有显著的相关性, 并且在频域中, 它们的周期信号的频率完全相同。在下一步工作中, 我们将在频域重新考虑热膨胀模型。

参考文献:

- [1] Nothnagel A. Journal of Geodesy. 2009, 83: 787
- [2] Petit G, Luzum B. IERS Conventions (2010). 36. Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010: 10
- [3] Le Bail K, Gipson J, Juhl J, et al. 21st Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. Espoo: SAO/NASA, 2013: 165
- [4] Altamimi Z. ITRF2020 Call for participation. itrf.ign.fr/doc.ITRF/CFP-ITRF2020.pdf, 2018
- [5] Haas R, Eschelbach C. IERS Technical Note No 33, Proceedings of the IERS Workshop on site co-location. Matera: IERS, 2003: 55
- [6] Zernecke R. Proceedings of the 13th working meeting on European VLBI for eodesy and astrometry. Bavarian Forest: IVS, 1999: 15
- [7] Wresnik J, Haas R, Boehm J, et al. 17th EVGA Working Meeting. Noto: European Geosciences Union, 2005: 45
- [8] Petrachenko B, Niell A, Behrend D, et al. Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee. Canada: IVS, 2009: 40
- [9] Dawson J, Sarti P, Johnston G M, et al. Journal of Geodesy. 2007, 81: 433
- [10] Eschelbach C, Haas R. Proceedings of the 16th Working Meeting on European LBI for Geodesy and Astronomy. Bundesamt: IVS, 2003: 109
- [11] Sarti P, Sillard P, Vittuari L. Journal of Geodesy. 2004, 78: 210
- [12] Lösler M, Haas R, Eschelbach C. Journal of Geodesy. 2013, 87(8): 791
- [13] Abbondanza C, Sarti P. Journal of Geodesy. 2012, 86: 181

Study on Thermal Expansion of Tianma 13.2-m VGOS Radio Telescope Based on Automatic and Real-time Monitoring System

SONG Shi-ze^{1,2}, WANG Guang-li^{1,2}, ZHENG Yong³,
SUN Zheng-xiong^{1,2}, LUO Ya-bo⁴

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Information Engineering
University, Zhengzhou 450000, China; 4. Changsha University of Science and Technology, Changsha
410000, China)

Abstract: The thermal expansion of the radio telescope is an important element in geodesy and astrometric VLBI data analysis. In order to study the thermal expansion of the Tianma 13.2-m VGOS (VLBI Global Observing System) radio telescope, a monitoring system has been developed, which can automatically and in real time monitor the thermal deformation of the corresponding antenna structure. By continuously observing a target mounted on the antenna azimuth axis 1.5 m directly below the reference point, the monitoring system

can determine the three-dimensional position variations of the prism. Based on continuous monitoring from 10 November 2020 to 31 August 2021 the results show that the maximum change of prism height is 2.6 mm in 10 months and 0.2 mm in one day. The horizontal displacement of the prism is not significant in 10 months. Finally, we verify the thermal expansion model of the IERS (International Earth Rotation Service) using the height thermal deformation of the Tianma VGOS telescope. The results show that the residuals between the observed data and the IERS model are less than 1.5 mm, and the RMS of the residuals is 0.43 mm. The IERS thermal expansion model can satisfy the current VLBI (Very Long Baseline interference) measurements, but not the accuracy requirements of VGOS. Therefore, the IERS thermal expansion model needs to be reconsidered for VGOS antennas.

Key words: VGOS; thermal expansion; monitoring system; correlation